



УДК 662.76

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА
ПАРОВОЙ ГАЗИФИКАЦИИ КОКСА
КАМЕННОГО УГЛЯ В ПРИБОРЕ
ТЕРМОГРАВИМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА****COMPUTATIONAL MODELING OF COAL COKE
STEAM GASIFICATION PROCESS PERFORMED IN
THERMOGRAVIMETRIC ANALYSIS DEVICE**

Овчарников Александр Олегович, магистрант каф. «Тепловые электрические станции», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 5. E-mail: strogg300@yandex.ru, Тел.: +7(906)813-33-24

Абаимов Николай Анатольевич, ассистент каф. «Тепловые электрические станции», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 5. E-mail: nick.sum41@mail.ru, Тел.: +7(906)815-08-28

Aleksandr O. Ovcharnikov, Master student, Department «Heat power plants», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Sofyi Kovalevskoy street, 5, Ekaterinburg, Russia. E-mail: strogg300@yandex.ru, Ph.: +7(906)813-33-24

Nikolay A. Abaimov, assistant, Department «Heat power plants», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Sofyi Kovalevskoy street, 5, Ekaterinburg, Russia. E-mail: : nick.sum41@mail.ru. Ph.: +7(906)815-08-28

Аннотация: Для повышения эффективности работы оборудования, производящего синтез-газ, необходимо проводить исследования кинетических характеристик угля – дешевого и распространенного вида топлива. Перспективным методом определения кинетических свойств твёрдого топлива является термогравиметрический анализ (ТГА). Прибор ТГА (в частности печь) конструктивно сложен и не даёт полного представления обо всех сторонах процесса, таких как аэродинамические особенности и распределение газов в объёме печи. Метод вычислительной гидродинамики (CFD) позволяет определить данные параметры. В докладе моделировался сегмент внутреннего, а также пространства, омывающего сам тигель. Моделировались моменты на 80-ой, 102-ой и 126-ой минутах с начала эксперимента по газификации. Сравнение результатов, полученных для этих трёх случаев, позволило установить характер концентрационных полей каждого из газов.

Abstract: Efficiency improvement of syngas generating equipment requires research of coal kinetic characteristics. A promising method for determining the kinetic properties of solid fuels is thermogravimetric analysis (TGA). The TGA device (in particular the furnace) is structurally complex and does not give a complete picture of all aspects of the process, such as aerodynamic features and the distribution of gases in the furnace volume. The method of computational fluid dynamics (CFD) allows to define these parameters. The report modeled the segment of the interior, as well as the space that washes the crucible itself.

Ключевые слова: термогравиметрический анализ (ТГА), вычислительная гидродинамика (CFD), кокс угля, кинетика химических реакций, ламинарное течение.

Keywords: thermal gravimetric analysis (TGA), computational fluid dynamics (CFD), coal coke, chemical reaction kinetic, laminar flow.

ВВЕДЕНИЕ

Для определения кинетических характеристик твердого топлива используется прибор термогравиметрического анализа (ТГА), принцип действия которого заключается в измерении убыли массы образца топлива, который находится на весах, расположенных в печи, при обдувании того газовой средой определённого состава и

температуры. Из измерительных приборов в печи имеются термомпары для определения температуры образца, прецизионные весы и устройство определения расхода газовых сред на входе в печь. Поэтому для определения аэродинамических характеристик и концентрационных полей требуется прибегать к инструментам моделирования, наиболее функциональным из которых является метод вычислительной

гидродинамики (Computational Fluid Dynamics, CFD) [1].

Цель работы – численное исследование гидродинамических процессов при паровой газификации каменного угля в приборе ТГА.

Для достижения поставленной цели надо решить следующие задачи:

- 1) подготовить CFD-модель сегмента внутреннего пространства тигля печи с необходимыми подмоделями;
- 2) проанализировать полученные расчётные результаты по гидродинамике и концентрационным полям газов в печи;

ОПИСАНИЕ РАБОТЫ ПРИБОРА ТГА

Термический анализатор NETZSCH STA 449 F3 Jupiter позволяет выполнять измерения изменения массы и тепловых эффектов, при температурах до 1250°C. Моделируемый эксперимент представлял собой процесс газификации Кузнецкого каменного угля марки Д в одном из двух тиглей. Второй тигель остаётся пустой, чтобы можно было сравнить температуры тигля с топливом и с пустым определить тепловой эффект реакции. На Рис.1. показана схема держателя с тиглями. Длина цилиндра (печи) – 74 мм, радиус – 16.7 мм. Сверху на тигли подается водяной пар, смешанный с аргоном с массовыми долями 0,529 и 0,471, соответственно. Снизу по трубке подается защитный газ – аргон. В эксперименте печь нагрели до 900°C и провели выдержку по времени.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Проанализировав зарубежную статью [3] о моделировании эксперимента в приборе ТГА, была предпринята попытка провести схожее исследование концентрационных полей в тигле с топливом. Геометрия модели, показанная на Рисунке 2, представляла собой внутреннее пространство печи, охватывающее сегмент тигля и среду вокруг него. Также в этом сегменте присутствуют частицы топлива с диаметром 0.05 мм. Сегмент имеет радиус 0.3 мм, и примерно составляет 0.013 от объема тигля. На основании данной геометрии построена сетка с 600 тыс. расчётных элементов, наиболее детальная часть которой представлена на Рисунке 3.

Исходные параметры для модели были взяты из точек максимальной убыли массы из каждого эксперимента.

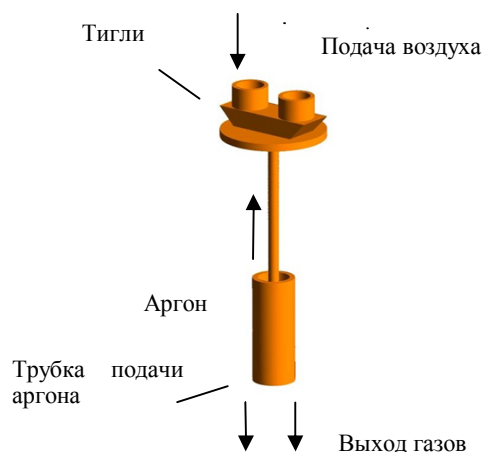


Рис. 1. Схема движения газов внутри печи прибора ТГА

Массовый расход газа равен $0,105 \cdot 10^{-6}$ кг/с. Зона реагирования угля с паром была представлена в виде поверхности частиц. Исходя из экспериментально определённой убыли массы навески рассчитаны расходы газов-реагентов для всех случаев приведены в Таблице 1.

Для моделирования не потребовалось использования моделей турбулентности, так как число Рейнольдса составило 57 (ламинарное течение), что намного меньше критического. Смесь газов состояла из CO , H_2 , Ar и H_2O . Абсолютное давление составляло 1 атм. Система изотермическая с температурой 900°C. На стенках – условия прилипания.

Таблица 1.

Расходы газов-реагентов			
	Поглощение H_2O , кг/с	Выделение CO , кг/с	Выделение H_2 , кг/с
80ая-минута	$0,1178 \cdot 10^{-10}$	$0,182 \cdot 10^{-10}$	$0,131 \cdot 10^{-11}$
102-ая минута	$0,293 \cdot 10^{-11}$	$0,456 \cdot 10^{-11}$	$0,325 \cdot 10^{-12}$
126-ая минута	$0,3186 \cdot 10^{-12}$	$0,496 \cdot 10^{-12}$	$0,354 \cdot 10^{-13}$



Рис. 2. Геометрия сегмента тигля

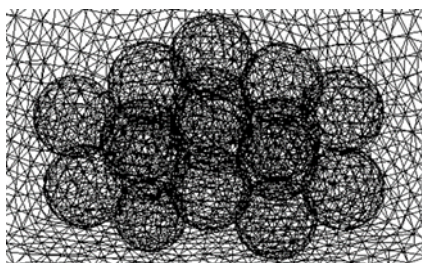


Рис. 3. Геометрия сегмента тигля

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рисунке 4 приведены результаты моделирования концентрации CO, на рисунке 5 – концентрации H_2 , а на рисунке 6 – концентрации H_2O . Как видно из Рисунка 3, на 80-ой минуте происходит пик образования CO, на 102-ой - образование уменьшилось, на 126-ой - практически прекратилось. На Рисунке 5 видна схожая тенденция, что и с CO. На рисунке 6 показаны результаты вычисления концентрационных полей пара. На них видно, что на 80-ой минуте идет поглощение большей части пара, поступающего в тигель, но на 102-ой минуте и далее пар полностью заполняет пространство тигля. Результаты по концентрации аргона не упомянуты, так как они схожи с таковым у пара, за исключением величины массовой доли в поступающей смеси.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Термогравиметрический анализатор - сложный прибор, применяемый для получения данных о кинетике гетерогенных реакций, но он не дает понимания происходящих в нем гидрогазодинамических процессов. Численное моделирование позволяет выявить необходимые параметры работы печи и оптимизировать методику проведения экспериментов.

Сравнение расчётных результатов моделирования работы прибора при разных условиях показало, что при различной температуре сжигания топлива меняются скорости газов внутри печи.

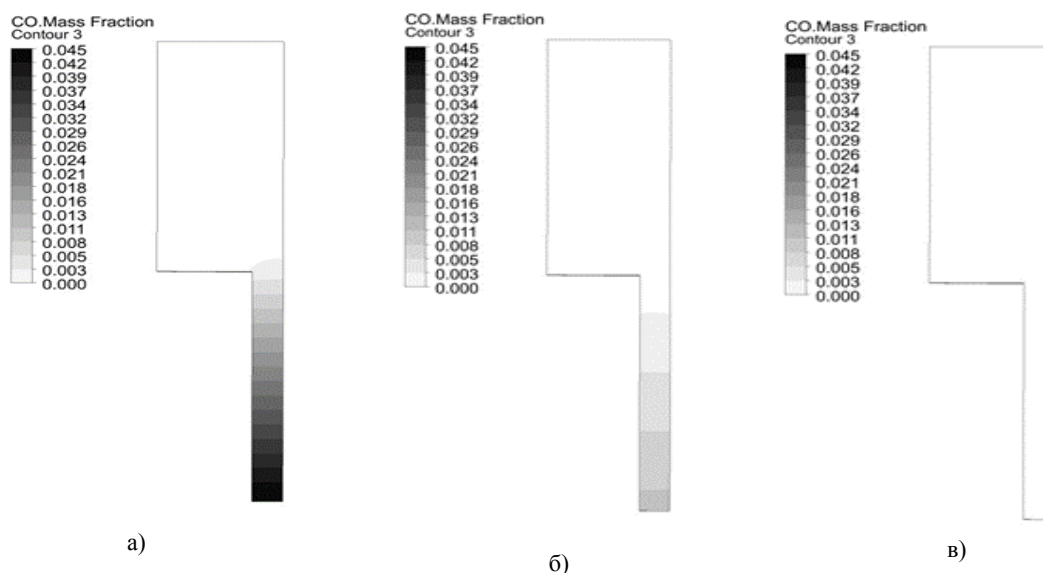


Рис. 4. Результаты моделирования концентрации CO: а) на 80-ой минуте; б) на 102-ой минуте; в) на 126-ой минуте

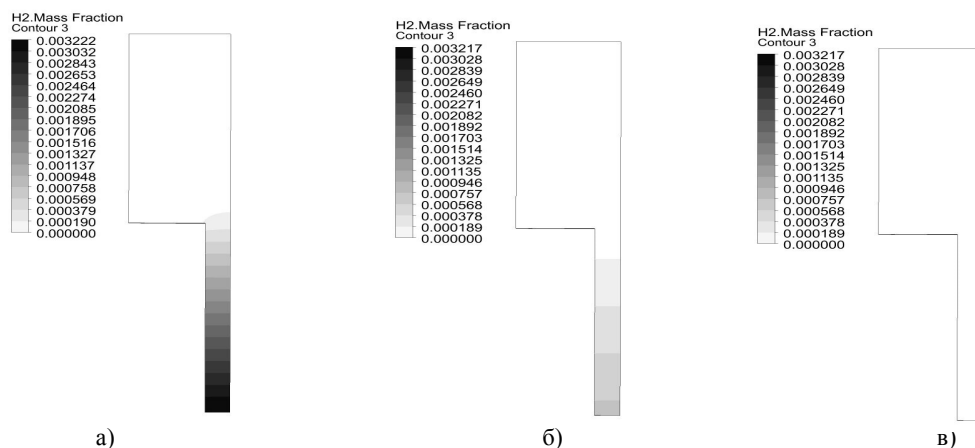


Рис. 5. Результаты моделирования концентрации H_2 : а) на 80-ой минуте; б) на 102-ой минуте; в) на 126-ой минуте

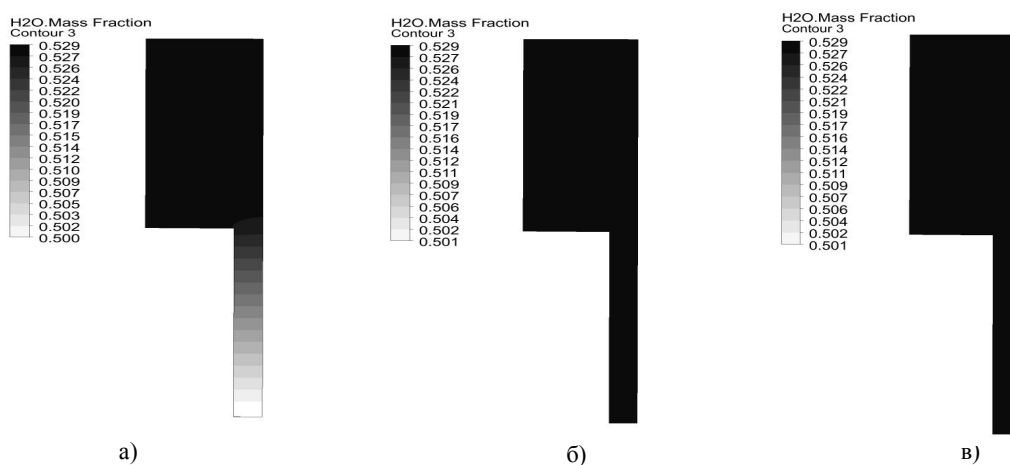


Рис. 6. Результаты моделирования концентрации H_2O : а) на 80-ой минуте; б) на 102-ой минуте; в) на 126-ой минуте

Концентрации исходных газов снижаются из-за добавления в смесь монооксида углерода и водорода, а также из-за разных условий горения меняется поглощение пара в тигле.

В частности, на 80-ой минуте пар присутствует только в середине тигля, а на дне он полностью поглощается углеродом. С другой стороны, на 102-ой минуте и дальше пар с аргонem полностью заполняют тигель, что свидетельствует об окончании процесса газификации.

Исследование выполнено в Уральском федеральном университете за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-00524).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рыжков А.Ф., Худякова Г.И., Осипов П.В. Абаимов Н.А. Исследование выгорания углей методом ТГА // Горение и плазмохимия, 2015, том 13, № 3, С. 176-180
2. Зубарев В.Н., Козлов А.Д., Кузнецов В.М., Сергеева Л.В., Спиридонов Г.А. Теплофизические свойства технически важных газов при высоких температурах и давлениях: Справочник. -М.: Энергоатомиздат, 1989. -232с.:ил.
3. S. Schulze, P. Nikrityuk, Z. Abostef, S. Guhl, A. Richter, B. Meyer. Heat and mass transfer within thermogravimetric analyser: From simulation to improved estimation of kinetic data for char gasification. Fuel 187 (2017) 338–348